고자기장자석의 발전과 최근 초전도자석 기술동향

DOI: 10.3938/PhiT.24.062

김 동 락

Advances in High Field Magnets and Recent Technical Trends of Superconducting Magnets

Dong Lak KIM

We may not only observe and obtain information of matter non-invasively, but also control the process of crystal growth and the synthesis of materials by using high magnetic fields. In 1936, the first 10 T high magnetic field was generated by water-cooled resistive magnet by professor F. Bitter at MIT for the research of Zeeman effect, and by the development of magnet technology the 38 T magnetic field was obtained at Nijmegen HFML in 2014. In June, 2000, 45 T high magnetic field, the highest static magnetic field, was achieved by hybrid magnet at NHMFL, which is the combination of a resistive magnet and a superconducting magnet. The high field resistive magnet consumes ~ 10 MW of electric power and need large chiller system because of Ohmic heating generated by resistive magnet. On the contrary, the superconducting magnet has "0" electrical resistance and almost no electrical energy loss. But the critical magnetic field of superconductor limited to reach higher magnetic field than resistive magnet. The appearance of the high temperature superconductor made possible to reach higher than 30 T and the 27 T is obtained in 2015 by 2G HTS magnet. Within several year 30 T class high field magnet will provide more opportunities and experimental time with better experimental conditions for user scientists and will contribute to advances in condensed matter physics and in bio and nano science and technology.

저자약력

김동락 박사는 1976년 경북대학교 물리학과 졸업, 1993년 일본 오사카 시립대학 대학원에서 저온물리학으로 이학박사 학위를 취득한 후, 1993-2014년에 한국기초과학지원연구원 책임연구원으로 근무하였으며, 2015년부터 한국기초과학지원연구원 전문위원으로 재직 중이다.
(dlkim@kbsi.re.kr)

서론: 왜 고자기장인가

1. 전자기의 탐구 - 자성(Magnetism)

물질이 가진 자성과 철을 끌어당기는 자기력에 대해서는 기원전부터 알려져 있다. 자성물질이 지구의 남북을 가리키는 현상을 알게 되면서 점차 실용적인 중요성을 알게 되었다.

자성은 전류가 흐르는 도선이나 자성물질이 힘을 미치는 공간을 나타내는 자기장과, 자기장에 의해 생기는 여러 가지 효과를 의미한다. 자성과 자기장에 대해서 18~19세기에 Faraday, Oersted, Maxwell 등의 과학자들에 의해 전류와 자기장에 대한 이해가 확립되면서 큰 진전이 이루어졌다.

2. 고자기장(high magnetic field)

여기에서 이야기하고자 하는 고자기장이란 일상생활에서 활용되는 자기장보다 수백~수천 배 큰 ~10 T급의 자기장에 대한 것이다. 이와 같은 자기장과의 연관성은 주위에서 찾아보기가 쉽지 않다.

“고자기장”이라는 용어는 시대에 따라 또는 활용하는 용도에 따라 각각 다른 자기장의 크기를 의미하는 상대적 개념이며, 목적에 따라 다양한 크기와 자기장의 세기를 가진 자석이 있다. 분야에 따라서는 아직 상용화가 되지 않았거나 일반적으로 보유하기 어려운 20 T 이상의 자석을 고자기장이라고 부르기도 한다. 자기장 세기의 단위는 T(테슬라, Tesla), G(가우스, gauss)를 사용하며 1 T = 10,000 G이다. 참고로 우리 주위에서 지구 자기장의 세기는 약 0.5 G이다.

고자기장 자석은 원래 극한조건에서의 물성 연구를 위해 개발되었으며, 자기장 이용은 응집계물성, 자성재료, 초전도, 반도체 등의 물성과학과 재료과학을 위시하여 화학, 생물학, 지구과학뿐 아니고 의학, 석유공학(Petroleum engineering) 등의 응용과학분야와 같이 과학기술의 광범위한 분야에 기여하고 있다.

30 T급 이상의 고자기장 연구장비는 현대 물질과학 연구분야에서 방사광가속기, 중성자산란 실험 장치와 더불어 3대 핵심 대형실험장치 중의 하나이다.

Table 1. High magnetic field facilities in the world.

Country	DC Field (T)	Pulse Field (T)
US	hybrid: 45 T NIMHFL	240 T(destr.) NIMHFL
	resistive: 35 T NIMHFL	100 T(non-destr.) NIMHFL
EU	hybrid: Grenoble, 43 T(*) Nijmegen, 45 T(*)	170 T(destr.) Thoulouse
	resistive: Grenoble, 35 T Nijmegen, 38 T	80 T(non-destr.) Dresden, Thoulouse
Japan	hybrid: 38 T NIMS	700 T(destr.) ISSP
	resistive: 25 T NIMS	87 T(non-destr.) ISSP
China	hybrid: 40 T, Hefei	80 T(non-destr.) Wohan
	resistive: 38 T, Hefei	
Korea	S.C.: 20 T, IBS 35 T(plan) KBSI	Dankuk U. 50 T Kukmin U. 40 T

(*) : under construction.

destr.: destructive pulsed magnet

어떻게 고자기장을 발생하는가

1. 자기장 발생

일반적으로 솔레노이드 자석에서 자기장은 도선에 흐르는 전류의 크기에 비례하며, 구리선이나 초전도선을 감아서 전류를 흘려 원하는 자기장을 얻는다.

$$B \propto N \cdot I$$

(B : 자기장 세기, N : 권선 수, I : 통전전류)

2. 고자기장 자석(high field magnet)

자기장을 발생하는 자석은 자기장을 유지하는 시간에 따라서, 연속적으로 자기장을 발생시키는 전자석과 순간적으로 매우 짧은 시간(~ 0.1 msec ~ 1 sec)에 자기장을 발생시킬 수 있는 펄스자석이 있다. 두 가지의 자석은 실험 목적 및 용도, 그리고 자기장의 세기 등에 있어서 각각 특징이 있으며 과학기술의 발전에 큰 기여를 하고 있다.[표 1] 여기에서는 연속자기장(static field, DC field)에 대하여 언급하도록 하겠다. 연속자기장 자석에는 영구자석, 전자석, 초전도자석 그리고 초전도자석과 전자석을 조합한 하이브리드 자석으로 나눌 수 있다. 영구자석과 상용화된 전자석으로는 대체로 ~ 2 T 정도의 자기장을 얻을 수 있다. 선재나 판재에 전류를 흘려서 자기장을 발생시키는 자석을 전자석(electromagnet, 電磁石)이라고 부른다. 전자석은 구리 등의 전기전도도가 좋은 재료로 제작되며, 영어로 resistive magnet이라고도 한다. 초전도자석은 전자석의 한 종류라고 할

Fig. 1. Progress of high field magnet. ■: Hybrid magnet (Resistive + LTS), △: resistive magnet, ○: LTS magnet, ●: SC hybrid magnet (LTS + HTS), ○●: HTS magnet (LTS: low temp. superconductor, HTS: high temp. superconductor) (KBSI).

수 있으며, 다만 사용되는 선재가 전기저항이 “0”인 초전도 도체를 사용하는 점에서 구별하여 초전도자석(superconducting magnet, sc magnet, 超傳導磁石)이라 부른다.

3. 수냉식 전자석(water-cooled resistive magnet)

본격적인 고자기장 자석의 개발은 일찌기 1930년 경부터 미국 MIT에서 시작되었다. 1939년 MIT의 Francis Bitter 교수는 Zeeman effect 연구를 위하여 연속적으로 자기장을 발생시키는 첫 10 T 전자석을 개발하였다. 이 전자석은 1.7 MW 전원으로 구동되는 수냉식 전자석으로, 이후 수냉식 고자기장 자석의 대명사로 불리는 Bitter 마그네틱의 효시이다.^[1] 고자기장 자석기술발전에 대해서는 [그림 1]을 참조바란다.

1960년 미 공군성의 지원으로 국립 고자기장 시설로서 기존에 10 T급 전자석이 있는 MIT에 Francis Bitter National Magnet Lab(FBNML)이 설립되었다. 그 주요 목적은 고체물리 연구, 특히 반도체 관련 연구를 위함이었다.

1960년대 미국은, 1957년 10월 구소련이 세계최초의 인공 위성인 스푸트니크 1호의 발사에 성공하면서 소위 스푸트니크 충격(Sputnik crisis)이라는 엄청난 충격을 받고, 우주개발이나 군비확장과 관련한 과학기술 분야는 물론 교육 분야에서도 많은 연구비를 투자하고 다양한 변화를 보이게 된다. 1964년에는 수냉식 20 T 전자석을 개발하게 되며, 1980년대까지는 20 T급 수냉식 자석이 고자기장 물성연구에 활용되었다.

1990년대에 들어오면서 20 MW급의 전원이 도입되면서 수

REFERENCES

- [1] R. J. WEGGEL, J. Magnetism and Magnetic Materials 11, 321 (1979).

Fig. 2. Water-cooled resistive magnet. (a) Bitter magnet, (b) poly-helix magnet.

냉식 자석으로 30 T 이상의 고자기장 발생이 가능하게 되었다. 최근의 수냉식 자석은 10~20 MW급 전원을 가지며 상온 실험공간 직경 30~35 mm에 30~38 T 자기장을 발생한다. 대부분의 고자기장 연구소에는 35 T 전후의 수냉식자석이 주된 자석이며, 2014년 Nijmegen 고자기장 연구소에서는 수냉식 자석으로서는 최고 자기장인 38 T를 달성하였다.

전자석이 현재의 수냉식 전자석으로 발전하여 오기까지 다양한 형태의 구조와 적합한 재질이 개발되었으며 대표적인 수냉식 전자석은 Bitter 및 Polyhelix 자석이다[그림 2]. 자석의 냉각시스템과 안정적 전류를 공급하는 전원 기술들이 함께 발전하여 왔다. 수냉식 자석의 부대시설에 대해서는 Nijmegen 고자기장연구소의 문헌을 참조바란다.^[2]

수냉식 자석은 냉각을 위하여 고압의 냉각수를 순환시켜야 하므로 이로 인하여 자석에 미세한 진동이 일어나거나 하여 자기장의 안정성이 좋지 않고 초전도자석과 같은 영구전류모드로 운전이 불가능하여 자기장 안정도가 수 100 ppm이었으나, 기술의 진보로 최근에는 자기장 균일도(homogeneity) 12 ppm@1cm³ (ferro-shim), 자기장 안정도(stability) 3 ppm 등의 품질 좋은 자기장을 얻게 되어 고체 NMR 실험이 가능하게 되었다.

4. 하이브리드 자석(hybrid magnet)

1970년대에 20 T 미만에 머무르던 수냉식 자석에 대해 연구자들은 더 높은 자기장을 요구하게 되었고, 1977년 2월에 당시 초전도자석 기술의 발전과 더불어 FBNML의 기술자들은

Fig. 3. 45 T hybrid magnet at NHMFL (home page).

Nijmegen magnet lab에 5 MW 전원을 가진 수냉식 자석을 초전도자석의 가운데 설치하는 하이브리드자석을 개발하게 된다. 그 때에는 획기적인 기술로서 32 mm 공간에 25.4 T를 발생하였다. 4개월 후에는 내경 40 cm의 8 T 초전도자석 내부에 9 MW급의 수냉식 자석을 설치하여 30.1 T 자기장을 발생하였다.^[3] 이로써 30 T 자기장 시대가 도래한 것이다. 1979년에는 FBNML에 30 T 하이브리드자석이 설치되었다.

1993년 미국 플로리다 주(Florida State)는 Florida 주립대와 함께, 탈라하시에 고자기장연구소(National High Magnetic Field Laboratory, NHMFL)를 유치하였다. NHMFL은 세계의 고자기장 기술을 선도하고 있으며, 1999년에 세계 최고 정자기장인 45 T 하이브리드자석을 완성하였다.[그림 3] 45 T 하이브리드자석은 상온공간 직경(room temp. bore diameter)이 32 mm로서, 30 MW 전원 및 Chiller, 헬륨액화기, 내부의 33.5 T 수냉식 자석과 외곽의 11.5 T 초전도자석으로 구성되어 있다.^[4]

2000년대에 들어오면서 프랑스 Grenoble 고자기장연구소(LNCMI-Grenoble)와 네덜란드 Nijmegen 고자기장 연구소(HMFL-Nijmegen)에서는 20 MW급 전원을 가지는 40 T급 하이브리드자석의 개발을 시작하였으며 순조롭게 진행되면 2016~

REFERENCES

- [2] J. A. A. J. Perenboom, *et al.*, Physica B **294-295**, 529 (2001).
- [3] M. J. Leupold, R. J. Weggel and Y. Iwasa, *Proc. 6th Int. Conf. Magnet Technology* (1977), p. 400.
- [4] John R. Miller. IEEE Trans. on Appl. Supercond. **13**(2), 1385 (2003).

Fig. 4. Power supply, cooling system and LHe refrigerator for hybrid magnet.

2017년에 개발이 완료될 것이다. Nijmegen 고자기장 연구소 외곽의 초전도자석은 12 T로 33 T의 수냉식 자석과 더불어 45 T를 발생한다.^[5] Grenoble의 하이브리드자석은 목표가 43 T이며 내측의 수냉식 자석이 38.5 T, 외곽의 초전도자석은 8.5 T로서 NbTi 선재로 제작되며, 초유동헬륨으로 1.8 K로 냉각되며, 내경은 1.1 m이다. 일반적으로 하이브리드용 초전도자석은 강한 자기력에 견디기 위하여 NbTi 또는 Nb₃Sn 선재로서 CICC(Cable In Conduit Conductor)로 제작한다. [그림 4]에 하이브리드자석의 전원, 냉각계, 헬륨액화시설을 보인다.

NHMFL의 45 T 하이브리드자석은 운전에 대량의 에너지가 소모되므로, 수냉식 자석의 일부를 고온초전도자석으로 대체하여 에너지 절약과 성능향상을 고려하고 있다.

세계의 고자기장 연구소에서는 향후 고온초전도자석을 도입하여 현용 하이브리드자석의 자기장을 47~50 T로 발전하게 될 것으로 보인다.

5. 초전도 자석(superconducting magnet)

초전도 선재는 저항이 없으므로 열이 나지 않아 전력 손실이 거의 없어 구리선보다 수십 배의 전류를 흘릴 수 있으나 초전도 특성을 얻기 위해서는 액체헬륨 등의 냉매를 사용하거나 극저온 냉동기로 초전도 임계온도, T_c , 이하로 냉각하여야 한다. [그림 5]에 초전도체의 상 그림(phase diagram)을 보인다.

초전도 선재의 종류에는 액체헬륨 온도에서 사용되는 저온초전도(low temperature superconductor, LTS) 선재로서 NbTi, Nb₃Sn, 임계온도가 액체질소보다 높은 고온초전도(high tem-

Table 2. General information of SC wire.

material	$T_c(K)$	$B_c(T)$	specification
NbTi	12	9	dia. 0.4~1.4. mm ex) Ic 200A@4.2K, 9T / dia 1.04 mm (#1)
Nb ₃ Sn	18	24	dia. 0.4~1.2 mm ex) Ic 839A@4.2K, 12T / dia 1.2 mm (#2)
YBCO	93	> 40	thickness, ~ 0.1 mm YBCO SC layer, ~1 μm width, 4 mm Ic: 100~200A@77K, ~ 1300A@4.2K (#3)
BSCCO (Bi-2223)	108	> 40	thickness, 0.2~0.3 mm width, 4.5 mm Ic: ~180A@77K (#4)

(#) Spec. is variable with the dimension & process

(#1) Supercon-wire, type 54S43

(#2) Oxford Instrument, Internal Tin R2006 RRP

(#3) Tape width variable, 4~12 mm

(#4) Sumitomo Electric Industries

Fig. 5. Phase diagram of superconductor. (Sci. Technol. Adv. Mater. 13, 054305 (2012))

perature superconductor, HTS) 선재 등이 있다. 국내에서는 KAT에서 저온초전도선재, (주)서남에서 고온초전도선재가 생산되고 있다. 초전도자석 제작을 위한 초전도선재에 대해서 [표 2]를 참조바란다.

1964년 Westinghouse에서 NbTi 선재로 2 K에서 10 T를 발생하는 초전도자석을 개발하였고, 입자가속기 발전과 NMR의 상용화와 더불어 초전도기술의 큰 진전이 이루어졌다. 1990년대에 선재기술의 발전으로 인하여 저온초전도자석은

REFERENCES

- [5] S. A. J. Wieggers, *et al.*, IEEE Trans. on Appl. Supercond. 20(2), 688 (2010).
- [6] Bruker Biospin, 1 GHz NMR system. 23.5 T (2009).
- [7] K. Hashi, *et al.*, J. Mag. Res. 256, 30 (2015).

Fig. 6. Critical current density of SC wire depends on magnetic field at 4.2 K (NHMFL, ASC home page).

Fig. 7. (a) 5 T HTS magnet, (b) 16.8 T magnetic field by (LTS+HTS) hybrid magnet at KBSI.

20 T 이상의 고자기장 영역까지 상용화되어 있으며, 현재는 2 K에서 23.5 T인 1 GHz NMR용 저온초전도자석이 Bruker사에서 시판되고 있다.^[6] 일본의 NIMS에서는 NMR용 1020 MHz (24 T) 초전도 하이브리드자석 개발과 NMR 신호획득에 성공했다. 이 자석은 저온초전도자석 가운데에 Bi-2223 선재의 고온초전도자석으로 3.66 T 자기장을 발생하였다.^[7]

최근에는 임계자기장이 50 T 이상이고, 고자기장 하에서도 임계전류밀도가 큰 BiSCCO(1G, 1st generation) 선재, YBCO (2G, 2nd generation) 선재 등 테이프 형상의 고온초전도(high temperature superconductor, HTS) 선재를 도입하여 고자기장 영역을 확장하기 위한 노력을 하고 있다. YBCO 고온초전도선재는 Y 대신 Gd 등 같은 주기율표 상의 희토류(Rare Earth) 원소로 대체하여 자기장 하에서 전류특성이 좋은 선재(GdBCO, REBCO라고도 함)를 공급하고 있으며 일반적으로 2G HTS라고 한다. 참고로 초전도선재의 임계전류밀도와 자기장과의 상관관계를 [그림 6]에 보인다. 고온초전도 선재는 임계온도가 액

체질소 온도(77.4 K)보다 높아, 용도에 따라서 저렴한 액체질소로 냉각할 수도 있어 냉각비용을 절감할 수 있다.

고온초전도선재는 저온초전도선재에 비해 임계자기장(B_c)과 임계전류밀도(J_c)가 크다는 점, 그리고 2G HTS는 기계적인 강도가 650 MPa로서 고자기장 하에서의 큰 Lorentz force에 견딜 수 있는 점 등으로 고자기장에 적합한 선재로 평가되고 있다. 한편으로는 선재의 비열이 커서 초전도자석이 켄치(Quench, 초전도 선재의 일부분에 초전도상태가 깨어져서 상전도상태가 됨)로 인해 국소적으로 주열 열이 발생함)가 발생하였을 때 초전도자석 보호(Quench protection)가 어려운 점이 있으며, 테이프 형상으로 인해서 선재 면에 자기장이 입사할 때 수직 자기장 성분으로 인한 차폐전류(Screening current)가 발생하여 자기장 안정성을 떨어뜨리는 문제점 등이 있다.

이에 대한 해결책으로 자석 제작을 위하여 권선할 때에 고온초전도선재에 절연층이 없이 권선하는 방식(N. I., no insulation, 무절연 방식)으로 제작하여 켄치가 발생할 때 생긴 열과 전류가 자석의 반경(radial) 방향으로 신속히 확산될 수 있도록 하여 초전도자석을 보호할 수 있다. 차폐전류 문제는 고온초전도자석에 약한 교류자기장을 가해 줌으로서 초전도선재 표면에 발생한 차폐전류를 상쇄시킬 수 있음이 확인되고 있으며, 해결방법을 개선해 가고 있는 중이다.

한국기초과학지원연구원(KBSI)에서는 2011년 세계 최초로 무절연 방식으로 REBCO 선재로 DPC(Double Pancake Coil)으로 5 T 고온초전도자석을 제작하여^[8] 시험한 결과, 자석을 안전하게 보호할 수 있음을 확인하였다. 또한 2013년에는 내경 102 mm의 14 T 전도냉각형 저온초전도자석 가운데에 5 T 고온초전도자석을 삽입하여 ~17 T 고자기장 발생에 성공하였다. 즉, 저온초전도자석과 고온초전도자석을 조합한 초전도 하이브리드자석 형태로 시험한 것으로, 그 결과를 [그림 7]에 보인다. (췌남에서는 REBCO 선재로 초전도자석을 제작하여 2015년 4월 고온초전도 선재만으로 세계 최고의 자기장인 26.4 T 고자기장을 발생하였다.[그림 8]

해외에서의 고온초전도자석 개발은, 미국립 고자기장연구소(NHMFL)에서 32 T 고자기장 초전도 하이브리드자석을 개발 중에 있으며, 2016년 개발 완료될 예정이다.[그림 9] 이 초전도 하이브리드자석은, 바깥쪽의 15 T 저온초전도자석은 Oxford사에서 공급하며, 안쪽에 삽입되는 17 T 2G 고온초전도자석은 NHMFL에서 자체 개발하고 있다.^[9]

REFERENCES

- [8] Myunghwan Ku, Dong Lak Kim, *et al.*, Progress in Superconductivity and Cryogenics **14**(3), 28 (2012).
- [9] H. W. Weijers, *et al.*, IEEE Trans. on Appl. Supercond. **24**(5) (2014).

Fig. 8. 2G HTS test results at 4.2 K. Max. B ~ 26.4 T. (from SuNAM)

Fig. 9. Cross section of 32 T superconducting hybrid magnet. Cold bore 32 mm (NHMFL).

최근 몇 년 사이에 2G 고온초전도선재의 성능 향상으로 신뢰성과 임계전류가 개선되어 77 K에서 폭 4 mm 선재에 150 A 이상의 임계전류를 가진 2G HTS 선재를 구할 수가 있으며 단위 길이 150 m 이상의 선재 공급이 가능하다.

현재 KBSI 및 국내외 기관에서 고온초전도자석 또는 (저온 초전도+고온초전도) 하이브리드자석에 대한 연구가 진행 중이며 조만간 30 T 이상의 고자기장 초전도자석이 등장하게 될 것이다. 고온초전도자석 기술의 발전으로 인하여 향후 50 T 이상의 차세대 고자기장 자석의 개발이 가능하게 될 것이다.

초전도자석과 수냉식자석을 비교해 볼 때, 초전도자석은 사용자 측면에서 반드시 좋은 점만이 있는 것은 아니다. 고온초전도자석은 자석의 인덕턴스가 크므로 30 T 자기장까지 도달에 1시간 정도 소요된다. 이에 비해 수냉식자석은 최고자기장까지 수 분 만에 도달할 수 있으며 자기장 변경을 유연하게 할 수 있어서 운전이 비교적 단순하여 편리하다. 시설 면에서

볼 때, 수냉식자석은 운전에 필수적인 20 MW급 전원과 대용량 냉각시스템이 필요하며 전원 및 냉각시설을 별도로 설치할 공간이 있어야 하므로 건물 및 시설비와 막대한 전기료 등의 운영비가 필요하다. 이에 비해 초전도자석은 1 kW급의 전원과 헬륨액화시설만 있으면 운영이 가능하다. 따라서 장치구축 경비와 운영비를 고려할 경우 고자기장 초전도자석을 여러 대 설치하여 운영하는 것이 큰 비용 절감과 연구자들에게 더 많은 실험시간을 제공할 수 있을 것이다.

고자기장 환경에서의 연구

고자기장을 이용한 연구로서 널리 알려진 것은, 1980년 독일의 F.v. Klitzing 교수 그룹이 20 T급 수냉식자석으로 관찰한 양자홀 효과(Quantum Hall Effect)를 들 수 있다.^[10] 양자홀 효과란 자기장의 세기에 따라 홀 저항($R_H = U_H/I$)이 일정하게 변하지 않고 (h/e^2) 에 비례한 저항치로서 계단모양으로 변하면서 평탄한 값을 가지며, 양자화되는 현상이다. 이 업적으로 1985년 노벨 물리학상을 수상하였다. 이어서 1982년에는 D. C. Tsui 교수 그룹이 분수 양자홀 효과(Fractional Quantum Hall Effect)를 발견하였으며,^[11] 1998년 노벨 물리학상을 수상하였다. 한편 김필립, A. K. Geim 등은 NHMFL의 45 T 하이브리드자석 등으로 graphene에서 상온 양자홀 효과를 발견하여 Science지에 발표하였다.^[12] A. K. Geim 등은 이 업적으로 2010년 노벨 물리학상을 수상하였다.

20 T 이상의 고자기장을 이용한 물성연구는 현재 국내에서는 할 수 없지만 국내 연구자들은 외국의 고자기장연구소 장비를 활용하여 우수한 연구결과를 얻고 있다.

[그림 10]은 서울대 김기훈 교수 연구그룹에서 36 T 고자기장 하에서 얻은 연구결과로서, 초전도가 고자기장 내에서 깨지는 물리적 원인에 대해, FeAs계 초전도 물질에는 강한 파울리 제한 효과에 의해 초전도의 쿠퍼쌍이 붕괴됨을 밝혀내었으며, 논문^[13]은 이 같은 기사를 총 정리한 논문이다. 서울대 박영우 교수 연구그룹은 전도성 고분자 폴리아세틸렌 나노섬유 한가닥에 35 T의 고자기장을 가하여 고분자필름 상태에서는 볼 수 없었던 자기저항(magneto resistance)이 “영”인 현상이 나타남

REFERENCES

- [10] K. v. Klitzing, G. Dorda and M. Pepper, Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980).
- [11] D. C. Tsui, H. L. Stormer and A. C. Gossard, Phys. Rev. Lett. **48**, 1559 (1982).
- [12] K. S. Novoselov, Z. Jiang, Y. Zhang, S. V. Morozov, H. L. Stormer and U. Zeitler, Science **315**, 1379 (2007).
- [13] Seunghyun Khim, Kee Hoon Kim, *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 104502 (2011).

Fig. 10. Magnetic-field-dependence of resistivity of a LiFeAs single crystal at fixed temperatures: 0.8, 1.9, 3, 6, 8, 10, 12, 14 and 16 K.

을 발견하였다.^[14] 이것은 세계 최초의 “자기저항 영” 현상 발견으로서 전기저항이 “영”이면서 자기장의 영향을 받지 않는 초전도 현상을 떠올리게 하는 매우 흥미로운 결과라고 할 수 있다. 포항공대 김준성 교수, 경북대 조연정 교수 연구그룹은, PdCrO₂ 단결정의 페르미면 정보를 30 T 자기장 하에서 고자기장 양자진동을 측정하여 규명하였다.^[15] 이 결과는 향후 4d 전이금속을 포함한 층상구조 자성체의 특이 자성구조와 전도특성을 이해하는데 중요한 기초정보를 제공할 것으로 기대된다.

고자기장 자석은 극한조건에서의 물성연구를 위해 개발되었으며, 때로는 단일 조건 하에서, 때로는 초저온, 초고압 등 여러 조건이 겹쳐진 다중극한환경 하에서 연구를 하기도 한다. 또한 중성자 산란장치, 방사광 가속기 장치와 결합하여, 시료에 자기장 환경을 제공함으로 다양한 상태에서의 물성의 변화

나 구조를 연구할 수 있다.

고자기장 초전도자석 기술은 기초물성 연구뿐 아니고 MRI, 입자가속기, Axion 등 암흑물질탐색, 핵융합장치, 초전도 자기 부상열차, 전력송전, 풍력발전 등 다양한 과학기술 및 산업분야에도 파급효과가 큰 기술이다. 조만간 국내에서 30 T 이상의 고자기장 초전도자석이 설치되어 세계적인 과학기술을 선도하는 날이 오기를 기대한다.

참고자료

주요 고자기장연구소의 web-site :

- NHMFL: 미국. National High Magnetic Field Lab., <https://nationalmaglab.org>
- Grenoble: 프랑스. Grenoble High Magnetic Field Lab. <http://lncmi-g.grenoble.cnrs.fr/>
- Nijmegen: 네덜란드. Nijmegen High Field Magnet Laboratory, <http://www.ru.nl/hfml/>
- Tsukuba: 일본. NIMS, Tsukuba Magnet Lab., <http://www.nims.go.jp/TML/>
- Sendai: 일본. Tohoku University, High Field Laboratory for Superconducting Materials, <http://www.hflsm.imr.tohoku.ac.jp/cgi-bin/index-e.cgi>
- Hefei: 중국. Hefei Institute of Physical Science, High Magnetic Field Laboratory of the Chinese Academy of Sciences (CHMFL). <http://english.hmfl.cas.cn/>

REFERENCES

- [14] J. G. Park, Y. W. Park, *et al.*, Synth. Met. **135-136**, 299 (2003); A. Choi, Y. W. Park, *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 155423 (2012).
- [15] Jong Mok Ok, Y. J. Jo, Jun Sung Kim, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 176405 (2013).